

УДК 539.125.5

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР НЕЙТРОНОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ МЮОНАМИ В ПОДЗЕМНОМ ДЕТЕКТОРЕ LVD

© 2009 г. Н. Ю. Агафонова, В. В. Бояркин, В. Л. Дадыкин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, В. В. Кузнецов, А. С. Мальгин, О. Г. Рязская, В. Г. Рясный, В. Ф. Якушев (коллорабация LVD), Н. М. Соболевский

Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН, Москва
E-mail: Agafonova@lvd.ras.ru

На подземном детекторе LVD (глубина 3650 м в.э.) получен энергетический спектр нейтронов в диапазоне энергий 30–450 МэВ, образуемых мюонами космических лучей в веществе детектора. Спектр нейтронов восстановлен с использованием спектра полных энерговыделений нейтронов в сцинтилляционных счетчиках объемом 1.5 м³.

ВВЕДЕНИЕ

Поток нейтронов, генерируемых мюонами космических лучей под землей, исследуется как источник фона в низкофоновых подземных экспериментах.

Спектр нейтронов в области энергий $T_n > 10$ МэВ был измерен в [1–3]: в [1] – диапазон энергий $T_n = 20$ –90 МэВ, вещество генерации нейтронов – соль; в [2] – $T_n = 10$ –50 МэВ, скальный грунт; в [3] – $T_n = 10$ –50 МэВ, вещество детектора KARMEN – железо. Спектр энерговыделений нейтронов в диапазоне $\epsilon_n = 10$ –300 МэВ, образуемых мюонами в веществе детектора LVD, представлен в [4, 5].

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

В данной работе получен дифференциальный энергетический спектр изолированных нейтронов в диапазоне 30–450 МэВ, генерируемых как непосредственно мюонами, так и в электромагнитных (em) и адронных (h) каскадах, производимых мюонами в веществе детектора LVD. Анализировались данные первой башни LVD, состоящей из 280 сцинтилляционных счетчиков размером $1.0 \times 1.5 \times 1.0$ м, образующих прямоугольный параллелепипед $6.2 \times 13.8 \times 10.0$ м с массой ~670 тонн, включающей в себя железо (Fe) и жидкий сцинтиллятор (ЖС) в равных долях. Железо регулярно распределено в объеме башни.

При анализе данных счетчики башни разбивались на две группы: мишень (t) и детектор (d). В t -группу входят счетчики одной колонны, d -группу образуют внутренние счетчики трех полуколонн, d -объем окружен слоями счетчиков вето-системы (рис. 1). Оба объема разделены s -полуколонной. Ее данные позволяют устранить помимо групп мюонов события, включающие в себя мюон в t -колонне и частицы его сопровождения, проникающие в d -объем. При этом форма энер-

гетического спектра нейтронов остается практически неизменной.

Критерии отбора позволяют выделять события прохождения через t -колонну околоразвертикальных мюонов и вызываемых ими em - или h -каскадов, содержащих нейтроны в счетчиках d -объема. Нейтронными считаются импульсы с энерговыделением (амплитудой) $\epsilon \geq 20$ МэВ во временном интервале $t_\mu = 0.25$ мкс после прохождения мюона. Длительность $t_\mu = 0.25$ мкс обусловлена разбросом времени срабатывания ФЭУ в счетчиках.

Критерии отбора делятся на группы T и D . Критерии T относятся к t -объему и обеспечивают отбор околоразвертикальных мюонов и каскадов, пересекающих t -колонну.

Критерии D относятся к счетчикам вето-системы и d -объема. Эти критерии, во-первых, исключают из событий группы T наклонные мюоны и мюонные группы, а также широкие каскады, способные симитировать взаимодействия нейтрона в d -объеме. Во-вторых, критерии D отбирают μ -события с нейтроном в d -объеме.

В соответствии с T -критериями отобрано 151 640 μ -событий. Из них с помощью D -критериев было выделено 552 мюонных событий, содержащих 552 нейтрона в d -объеме.

Для определения энергетического спектра нейтронов использован d -объем с толщиной в три полуколонны (рис. 1). Такая толщина выбрана на основании анализа распределения нейтронов по полуколоннам, показавшего, что в этом слое поглощаются не менее 80% быстрых нейтронов, попавших в d -объем. Кроме того, это позволяет увеличить статистику, принимая поочередно каждую из колонн в качестве мишени.

Таким образом, при определении спектра нейтронов использовался d -объем $6 \times 3 \times 5 = 90$ м³,

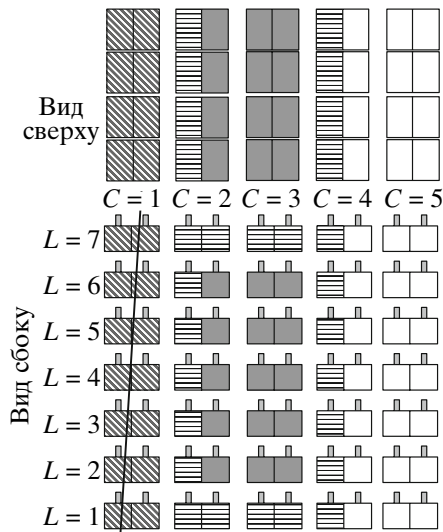


Рис. 1. Схема эксперимента. Счетчики с наклонной штриховкой – счетчики t -колонны, темные – d -объем, с горизонтальной штриховкой – вето-система.

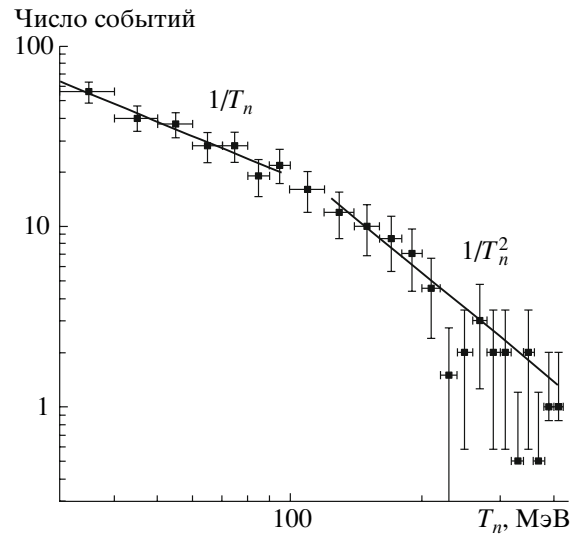


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов dN/dT_n .

образуемый $4 \times 3 \times 5 = 60$ счетчиками с массой сцинтиллятора 72 тонны.

В счетчиках d -объема регистрируются энерговыделения протонов отдачи и продуктов неупругого взаимодействия nC , nFe , главным образом γ -квантов и протонов.

Предполагалось, что одновременное появление в d -объеме двух и более нейтронов мало вероятно. Это следует из данных, полученных в [6] по определению полного выхода нейтронов, образуемых мюонами в веществе LVD.

Полным регистрируемым энерговыделением нейтрона E_d является сумма энерговыделений

$$E_d = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i, \quad m - \text{количество счетчиков с энерговыделением } \varepsilon_i.$$

Соответствие между E_d и T_n устанавливалось моделированием прохождения нейтрона через счетчики d -объема методом МК. Расчет выполнялся для фиксированных T_n из диапазона энергий 30–450 МэВ. Нейтроны с энергией T_n производят в сцинтилляторе энерговыделения в широком энергетическом интервале от нуля до $E_d^{max} < T_n$ со средней величиной E_d , которая соответствует энергии нейтрона T_n . Расчет учитывал в среднем потери энергии во взаимодействиях в ЖС, недомер энергии нейтрона за счет эффекта концентрационного тушения для протонов отдачи и продуктов nC -реакций, а также энерговыделение γ -квантов, излучаемых как возбужденными ядрами ^{12}C , так и ядрами, образуемыми в реакциях nC , pC , nFe , pFe (Код SHIELD [7, 8]).

2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР НЕЙТРОНОВ

Энергетический спектр нейтронов dN/dT_n был получен с использованием спектра энерговыделений dN/dE_n нейтронов в d -объеме толщиной в три полукolonны.

На рис. 2 приведен спектр dN/dT_n в диапазоне энергий T_n от 30 до 450 со статистическими ошибками.

В диапазоне от 30–120 МэВ совокупность точек описывается зависимостью $dN/dT_n = Ax^{-1.106 \pm 0.301}$, в диапазоне от 120 до 450 МэВ $dN/dT_n = Bx^{-2.050 \pm 0.137}$, где $A = 0.00001$, $B = 0.0011$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 06-02-16337, НШ 959.2008.2.), ФЦНТП 01.2.00 305502 и программы Президиума РАН “Нейтронная физика. Коллапс” 13-05-01.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальгин А.С., Рязская О.Г., Рясный В.Г., Хальчуков Ф.Ф. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 36. С. 308.
2. Barton J.C. // Proc. 19th ICRC. La Jolla. 1985. V. 8. P. 98.
3. Armbruster B. et al. // Phys. Rev. D. 2002. V. 65. № 112. P. 001.
4. Aglietta M. et al. // Proc. 26th ICRC. Salt Lake City. 1999. V. 2. P. 44.
5. Aglietta M. et al. (LVD Collaboration) // Proc. 29th ICRC. Pune. 2005. V. 6. P. 337.
6. Агафонова Н.Ю. и др. (LVD Collaboration) // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69 № 3. С. 400.
7. Dementyev A., Gurentsov V., Ryazhskaya O., Sobolevsky N. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1999. V. 70. P. 486.
8. <http://www.inr.ru/shield>